

Fijación de biomasa y carbono por las repoblaciones forestales jóvenes

Rafael Calama¹,
Eduardo López-Senespleda¹,
Guillermo Madrigal¹,
Marta Pardos¹,
Miren del Río¹,
Ricardo Ruiz-Peinado¹,
Elena Robla²,
Guillermo Fernández²,
María Pasalodos²,
María Menéndez-Miguel¹

¹Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR, INIA-CSIC).
Ctra. A Coruña, km 7.5. 28040 Madrid
²Subdirección General de Política Forestal y Lucha
contra la Desertificación. MITERD.
Gran Vía de San Francisco, 4. 28005 Madrid

El incremento de la superficie forestal mediante la repoblación de terrenos deforestados o degradados se considera una de las medidas más eficaces para contribuir al cumplimiento de los objetivos de neutralidad climática y mitigación del cambio climático. Sin embargo, existen numerosas incertidumbres acerca de la capacidad y potencial real de fijación de C por este tipo de nuevas formaciones, motivadas en parte por la falta de herramientas específicas para realizar una cuantificación precisa de la biomasa contenida y la capacidad de fijación de C atmosférico por las repoblaciones forestales. En este trabajo se presenta la red de parcelas en repoblaciones forestales jóvenes (<30 años) instaladas por el Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR) en colaboración con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), así como distintos modelos de fijación de biomasa construidos al objeto de satisfacer las distintas necesidades de información requeridas por administraciones públicas y propietarios privados.

INTRODUCCIÓN

En el marco del Acuerdo por el Clima de París se firmó un compromiso para mantener el “incremento de la temperatura media global por debajo de + 2 °C respecto de los niveles preindustriales”. La consecución de este objetivo requiere de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a las actividades industriales y al cambio de usos del suelo, y del aumento del potencial de los sumideros terrestres de carbono atmosférico (Griscom

et al. 2017). Dada la capacidad de fijación de carbono atmosférico que los árboles y bosques poseen por medio de la fotosíntesis, el incremento de la superficie forestal mediante la repoblación de terrenos deforestados o degradados se considera una de las medidas más eficaces para contribuir al cumplimiento de los objetivos de neutralidad climática y mitigación del cambio climático (Chazdon y Brancalio, 2019). Un ejemplo de la importancia de la repoblación forestal en las políticas de mitigación del

cambio climático es el caso del sector de Usos de la tierra, cambios de uso y silvicultura (LULUCF), sector con absorciones netas de C atmosférico, y en el que uno de los principales compartimentos a considerar como sumidero es el de las tierras forestadas (aumento de la superficie forestal debido a la acción humana) durante los primeros 20 años tras la plantación (Robla y González, 2018).

En paralelo a la consideración a nivel internacional del papel que las repoblaciones forestales pueden jugar en el marco de las políticas de mitigación del cambio climático han surgido distintas iniciativas, como el Decenio de Restauración de Ecosistemas de la ONU, el reto de Bonn para restaurar 350 millones de hectáreas degradadas antes de 2030 o la Estrategia Forestal Europea con el programa de plantación de 3000 millones de árboles entre 2020-2030 (Comisión Europea, 2021). A nivel nacional, hay que destacar iniciativas como el *Registro de Huella de Carbono, compensación y proyectos de absorción de CO₂* del MITERD, que es un programa voluntario que permite a las empresas compensar su huella de carbono mediante la contabilización de C atmosférico fijado por los proyectos de repoblación (<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/registro-huella.html>).

En este punto es necesario destacar que a nivel nacional el interés por la actividad repobladora no es reciente, cifrándose en cerca de cinco millones de hectáreas la superficie repoblada en España desde finales del siglo XIX, destacando los más de tres y medio millones de hectáreas repobladas entre 1950 y 1977 en el marco del Plan General de Repoblación Forestal (Ximénez de Embún y Ceballos, 1939). En época más reciente, desde 1993 se han repoblado en España más de 1 200 000 hectáreas (MITECO 2022, Vadell *et al.* 2016) en el marco de distintos programas, entre los que destaca el de Forestación de Tierras Agrarias (FTA). Toda esta actividad repobladora es en parte responsable del notable incremento experimentado en la superficie forestal arbolada española en las últimas décadas.

Pese al importante papel que las repoblaciones forestales pueden jugar en la mitigación del cambio climático, existen numerosas incertidumbres acerca de la capacidad y potencial real de fijación de C por este tipo de nuevas formaciones. De un lado, existen múltiples controversias acerca de la disponibilidad real de superficie a repoblar y las posibles incompatibilidades con otros usos del territorio (Veldman *et al.* 2019). Por otra parte, no se dispone de herramientas específicas para realizar una cuantificación precisa e insesgada de la biomasa contenida y la capacidad de fijación de C atmosférico por las repoblaciones forestales.

En general, las ecuaciones de biomasa de árbol individual disponibles (p.ej. Ruiz-Peinado *et al.* 2011, 2012) se construyeron a partir de muestreos destructivos de arbolado adulto, con diámetro normal superiores a siete centímetros, obtenido en masas naturales o repoblaciones antiguas naturalizadas, no teniendo en cuenta las particularidades en cuanto a crecimiento inicial y alometría propias de las edades jóvenes en repoblaciones (Menéndez-Miguélez *et al.* 2022). Por otra parte, herramientas para cuantificar a escala de rodal, como el Mapa Forestal Español (MFE) o el Inventario Forestal Nacional (IFN), no tienen información adecuada sobre estos bosques jóvenes en transición, al componerse de árboles con diámetro inferior al mínimo establecido y al tratarse de superficies de pequeño tamaño o de titularidad privada. Por todo lo anterior, se considera necesario el desarrollo de modelos que permitan cuantificar la fijación y acumulación de biomasa total y fijación de carbono, así como sus correspondientes crecimientos anuales, para repoblaciones forestales jóvenes. El objetivo del presente artículo es presentar el estado actual de los trabajos desarrollados desde el año 2018 en el marco de las colaboraciones suscritas entre el ICIFOR y el MITERD a través de la Encomienda de Gestión EG-17-042-C2.2 y del proyecto MITECO2023-AF-20234TE005. Estos trabajos están orientados a la construcción de herramientas que permitan responder a los distintos requisitos de información sobre la ca-

pacidad de fijación de C por las repoblaciones solicitadas desde distintas administraciones públicas (Inventario Nacional de Emisiones GEI, MITERD, OECC, CCAA) y entidades privadas.

FASES DEL TRABAJO

Fase 1. Definición del tipo de modelos a desarrollar

Una fase inicial de la línea de trabajo conjunta consistió en la identificación, definición y diseño del tipo de herramientas requeridas, y de los potenciales usos y usuarios de las mismas. En una primera fase se identifican dos tipos de modelos. Los primeros son los conocidos como modelos *ex ante*, que permiten realizar una estimación o proyección de la capacidad de fijación de biomasa y C por una repoblación antes de realizarse la misma utilizando datos del proyecto de plantación (superficie, especies, densidad inicial). Los modelos *ex post* son los que permiten la estimación real actual del C fijado por una repoblación, a partir de datos de inventario de la plantación en un momento dado. En ese sentido, el modelo *ex ante* permite dar un valor del potencial de fijación de biomasa y C por un determinado proyecto de absorción adscrito al Registro Nacional de Huella de Carbono en el momento de la plantación, mientras que el modelo *ex post* se puede emplear para verificar la capacidad real de fijación del proyecto. Los modelos *ex ante* tienen asimismo utilidad para realizar estimaciones de C fijado a nivel regional o nacional, al no requerir mediciones a escala de plantación.

- Una vez identificadas las necesidades, planteamos la construcción de distintos modelos:
- Modelos de biomasa de árbol individual, que permitan la estimación *ex post* de la biomasa fijada por un árbol o rodal a partir de datos de inventario adaptados a las particularidades de las repoblaciones forestales

Modelos que permitan la estimación *ex ante* y proyección en el tiempo de la biomasa fijada por una repoblación, a partir de datos del proyecto de repoblación (año de plantación, superficie, especies empleadas, densidad de plantación...).

Los modelos deben desarrollarse de forma tal que cuanto mayor sea la información de la que se dispone, más precisa sea la estimación. En ese sentido, no es igual la información de la que se dispone a nivel de estadística nacional, donde lo que se conoce es la superficie repoblada con una especie dada en un año determinado, que la disponible a nivel de un proyecto determinado, donde se conoce con exactitud aspectos como densidades iniciales de plantación, especies empleadas, localización exacta, trabajos de preparación del terreno, etc.

Fase 2. Identificación de las principales especies empleadas

Una vez definidas las herramientas a desarrollar, la siguiente fase consistió en identificar las principales especies forestales utilizadas en repoblaciones en España desde el año 1993. A través de la consulta a los distintos Anuarios de Estadística Agraria y Forestal, bibliografía especializada y cuestionarios a las CC. AA. se identificaron inicialmente las siguientes 15 especies y géneros:

- *Quercus ilex*
- *Quercus suber*
- *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* y *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*
- *Pinus radiata*
- *Pinus sylvestris*
- *Pinus nigra*
- *Pinus halepensis*
- *Pinus pinea*
- *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*
- *Populus híbridos*
- *Castanea sativa* + híbridos
- *Quercus robur*/Q. *petraea*
- *Quercus pyrenaica*
- *Quercus faginea*
- *Olea europea*

En fases posteriores se incluyeron otras especies o géneros con menor relevancia superficial, tales como *Fagus sylvatica*, *Betula* spp., *Juniperus* spp., *Fraxinus* spp. Por último, recientemente se ha extendido el estudio a especies exóticas de crecimiento rápido que están siendo introducidas en la actualidad en amplias zonas del norte de España, tales como *Sequoia sempervirens*, *Larix* spp., *Pseudotsuga menziesii* o *Cryptomeria japonica*.

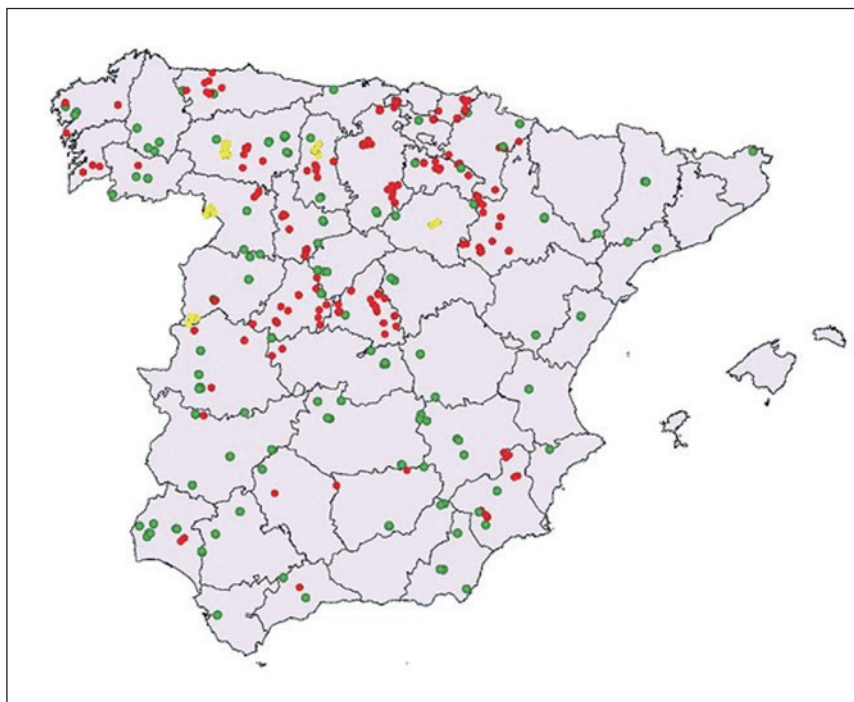


Fig. 1. Localización de las parcelas de muestreo de la red ICIFOR (rojo), FTA (verde) y CONVENIO (amarillo)

Fase 3. Replanteo de parcelas en campo

Para el cumplimiento de los objetivos se ha propuesto el establecimiento de una red de parcelas de seguimiento en repoblaciones jóvenes (< 30 años) a nivel nacional, abarcando las especies antes identificadas, y que cubra los distintos intervalos de clases de edad y características de estación. Un requisito adicional es que la repoblación pueda considerarse exitosa, con un porcentaje de supervivencia nunca inferior al 50-60 %. La red se empezó a instalar en 2018, y consta en la actualidad (1 de febrero de 2024) de 304 parcelas instaladas por el ICIFOR (INIA-CSIC), que cubren 12 comunidades autónomas, 28 provincias y las principales zonas bioclimáticas (Figura 1).

Para la selección de las parcelas —una vez identificados los tipos de repoblación a muestrear en cada provincia o comunidad autónoma— se procede a contactar con los servicios forestales competentes o asociaciones de propietarios al objeto de realizar una preselección de posibles fincas donde llevar a cabo los muestreos. En una primera fase se recopila toda la información general de la repoblación, se localiza la finca mediante ortofoto, lo que permite

identificar zonas con menor porcentaje de marras, accesibilidad, etc., y se realizan visitas preliminares.

Una vez seleccionadas las fincas/montes objeto del muestreo, se determina el número de parcelas a instalar, que variará entre uno y cuatro dependiendo de la heterogeneidad de la repoblación. Las parcelas son cuadradas o rectangulares, de entre 400 m² y 1000 m² de superficie, y deben incluir un mínimo de 25 árboles. En cada parcela se mide en todos los árboles: (i) altura, (ii) diámetro a la altura de tocón, (iii) diámetro normal (si altura > 1,30 m) y (iv) estado sanitario, así como el diámetro de copa en una submuestra de pies (Figura 2). Asimismo, se toman datos generales sobre el estado de la repoblación, marras y tratamientos realizados (laboreos, desbroces, podas), y se toman muestras del horizonte orgánico del suelo forestal (litter *bajo copa*).

La red de 304 parcelas se ha complementado con las parcelas del Observatorio de Forestación de Tierras Agrarias establecida por el MITECO en 2008 (red FTA), y que incluyen datos de más de 200 parcelas instaladas en 100 fincas repobladas, así como con los datos de 68 parcelas instaladas por el ICIFOR 2005-2006 en repoblaciones de entre 20 y



Fig. 2. Trabajos de inventario en parcela de *Fraxinus angustifolia* de 15 años (Alcobendas, Madrid), parcela de *Pinus pinea* de 5 años (Adanero, Ávila) y parcela de *Quercus suber* de 18 años (Mérida, Badajoz)

40 años de edad de *Pinus pinea*, *P. pinaster*, *P. sylvestris* y *P. nigra*, localizadas en distintas provincias de Castilla

y León en el marco de distintos convenios (red CONVENIO). Al tratarse en muchos casos de repoblaciones mix-

Tabla 1. Representación de las distintas especies en la base de datos según clase de edad

Especie	N	<5 años	6-10 años	11-15 años	16 – 20 años	> 20 años
<i>Pinus sylvestris</i>	48	3	7	13	8	17
<i>Pinus pinea</i>	94	6	21	29	17	21
<i>Pinus halepensis</i>	107	4	12	54	11	26
<i>Pinus nigra</i>	59	5	4	14	10	26
<i>Pinus pinaster</i> mes.	58	1	5	17	9	26
<i>Pinus pinaster</i> atl.	36	21	11	3	1	
<i>Pinus radiata</i>	10	3	2	4	1	
<i>Juniperus</i> spp.	14	2		10	2	
<i>Q. robur</i> + <i>Q. petraea</i>	15	2	1	9	3	
<i>Quercus pyrenaica</i>	14	4	1	4	4	1
<i>Quercus faginea</i>	34	4	1	18	2	9
<i>Quercus ilex</i>	168	14	19	104	14	17
<i>Quercus suber</i>	63	3	9	32	14	5
<i>Olea europea</i>	27		3	15	1	9
<i>Fraxinus</i> spp.	13		2	6	5	
<i>Fagus sylvatica</i>	10		2	4	3	1
<i>Betula</i> spp.	12	3	1	8		
<i>Castanea</i> spp.	31	3	9	10	6	3
<i>Populus</i> híbridos	16	10	5	1		
<i>Eucalyptus globulus</i>	10	4	4	2		
<i>Eucalyptus nitens</i>	9	4	4	1		
Otras frondosas	46		2	37	5	2
Coníferas productivas	21	1	3	6	5	5
TOTAL	915	97	128	401	121	168

Donde N representa el número de parcelas en las que aparece la especie

tas, incluyendo dos o más especies, el número total de datos de especie por parcela, para las 24 principales especies utilizadas en repoblaciones, asciende a 915 observaciones (Tabla 1). En los próximos años está prevista aumentar la muestra en comunidades como Andalucía y Castilla-La Mancha, extender la red a las Islas Canarias, y completar muestreos en especies menos representadas, como *Quercus pyrenaica*, *Ceratonia siliqua*, *Fraxinus* spp., *Celtis australis*, *Juglans* spp., *Ulmus* spp., entre otras.

Muestreos destructivos a escala de árbol

En paralelo al montaje de la parcela, y dependiendo de la disponibilidad de permisos de corta, dentro de cada finca o monte se selecciona un máximo de diez árboles por especie, en



Fig. 3. Apeo, fraccionamiento y pesaje de las distintas fracciones en campo. Repoblación de *P. pinea* en Uruña (Valladolid), *Quercus ilex* en Moraverdes (Salamanca) y *Eucalyptus nitens* en Boimorto (A Coruña)

los que se realiza un muestreo destructivo para determinar la biomasa exacta del pie. Antes de cortar cada uno de los árboles se ha procedido a la medición de su diámetro a la altura del tocón (cm), diámetro normal (cm), altura total (m) y dos diámetros de copa (cm) perpendiculares entre sí. Una vez realizadas estas mediciones, se ha cortado cada árbol y se ha procedido a un muestreo destructivo del mismo, separando las fracciones < 2 cm de diámetro (ramillos y hojas), y las fracciones > 2 cm de diámetro y el fuste (ramas gruesas y fuste). Cada una de estas fracciones de biomasa ha sido pesada en verde con una

balanza digital portátil (Figura 3) y anotada su valor para la posterior estimación de la humedad de la muestra. Finalmente, se ha cogido una submuestra de aproximadamente 2,5 kg de cada fracción, que fueron llevadas a laboratorio y secadas en una estufa a $102 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante para la determinación del porcentaje de peso seco (biomasa) de cada componente evaluada. La rodaja basal se extrae en todos los pies apeados con diámetro de tocón > 2 cm, con el objetivo de estudiar el patrón de crecimiento radial, y en una muestra de pies se realiza un análisis de tronco, extrayendo

rodajas a distintas alturas, para determinar el patrón de crecimiento en altura. El número total de pies analizados es de 1369, abarcando las principales especies utilizadas en repoblaciones. Más información sobre los muestreos destructivos pueden encontrarse en Menéndez-Miguélez *et al.* (2022).

RESULTADOS

Ecuaciones de biomasa de árbol individual

Los datos de los muestreos destructivos han sido empleados para la construcción de modelos alométricos de biomasa de árbol individual, con validez para repoblaciones jóvenes. Los modelos son de tipo potencial:

$$B_{pie} = a_0 X^{a_1}$$

Donde B_{pie} es la biomasa aérea del árbol, a_0 y a_1 son parámetros a modelizar y X representa la variable predictor. Para cada una de las especies antes indicadas se han construido y comparado modelos en función de las siguientes cinco posibles variables predictoras: diámetro medido a la altura del tocón (d_t , cm), altura total (h , m), superficie de proyección de copa ($scopa$, m^2), así como las combinaciones $d_t^2 \cdot h$ y $scopa \cdot h$. El empleo del diámetro medido a la altura del tocón en vez del diámetro normal está justificado, puesto que para algunas especies y localizaciones pueden transcurrir muchos años hasta que todas las plantas alcancen 1,30 m de altura. Los modelos que muestran en general un mejor ajuste para todas las especies son los que utilizan el producto entre el cuadrado del diámetro de tocón y la altura de la planta como predictor ($d_t^2 \cdot h$), variables comúnmente medibles en inventario de campo. Sin embargo, los modelos que solo utilizan la altura o la sección de copa (o el producto de ambas) pueden tener interés para ser aplicados en el caso de inventarios realizados a partir de ortofoto o vuelos LIDAR.

Los modelos de biomasa de árbol individual para individuos jóvenes de las principales especies están disponibles en acceso abierto

Tabla 2. Valor medio estimado de biomasa en función de la edad para las principales especies coníferas utilizadas en repoblaciones forestales en España

Especie	Zona	Biomasa contenida (kg M.S. ha ⁻¹) a la edad de					Densidad actual
		5	10	15	20	25	
<i>Pinus sylvestris</i>	1: Todas zonas salvo ATL	9837	21437	33811	46716	60030	1450
	2: ATL	11686	27426	45175	64368	84713	
<i>Pinus pinea</i>	1: MN	4186	11045	19481	29139	39821	890
	2: CLEV + OCC	4186	11045	19481	29139	39821	
<i>Pinus nigra</i>	1: Todas zonas salvo ATL	2432	10145	23393	42318	67021	1250
	1: ATL	4183	22042	58269	116138	198298	
<i>Pinus halepensis</i>	1: MN	3329	10099	19329	30637	43792	860
	2: CLEV + OCC	4143	13810	27928	46031	67823	
	3: AR	1754	4037	6575	9293	12154	
<i>Pinus pinaster mes.</i>	1: OCC	13182	25993	38666	51252	63772	1200
	2: Resto zonas	9819	17055	23556	29622	35384	
<i>Pinus pinaster atl.</i>	ATL	6683	29783	71384	132725	214725	900
<i>Pinus radiata</i>	Todas las zonas	11332	70692	206284			1000
<i>Juniperus spp.</i>	Todas las zonas	<100	408	2093	6673	16402	1400

Nota: densidad actual se refiere a la densidad promedio de las repoblaciones analizadas. Cuando no se da estimación es porque los modelos no son fiables a esa edad o no existen suficientes datos en la base. Zonas de acuerdo a lo recogido en figura 5

en Menéndez-Miguélez *et al.* (2022), con la excepción de los modelos para *Castanea spp.* y *Eucalyptus spp.*, publicados también en abierto en Menéndez-Miguélez *et al.* (2023) y Calama *et al.* (2022), respectivamente. Asimismo, para aquellas especies de las que no se dispone de ecuación específica, se han ajustado modelos generales por grupo de especie (coníferas, frondosas caducifolias y frondosas perennifolias).

Ecuaciones de biomasa por hectárea repoblada

Una vez disponibles los modelos alométricos de árbol individual, estos se aplican a todos los individuos de cada una de las parcelas medidas, lo que permite obtener una estimación de la biomasa total contenida en la parcela para cada una de las especies presentes, valor que se extrapola a la hectárea. Con este dato se procede al ajuste de modelos para estimar la biomasa y C fijado para una hectárea repoblada con una especie dada. Al objeto de poder dar estimaciones en un momento determinado y proyectar en el tiempo, se van a utilizar modelos potenciales que, en su versión más

básica, usan la edad de la repoblación como única variable predictora (ecuación 2, figura 4).

$$B_{total} = \beta_0 T^{\beta_1}$$

Donde B_{total} representa la biomasa contenida en una hectárea re-

plada (kg materia seca ha⁻¹), T la edad de la plantación (años), y son parámetros del modelo

Dada la gran dispersión observada, en una segunda fase los modelos han sido ajustados bien de manera independiente para distintas zonas geográficas, definidas con criterios de similitud climática o ed-

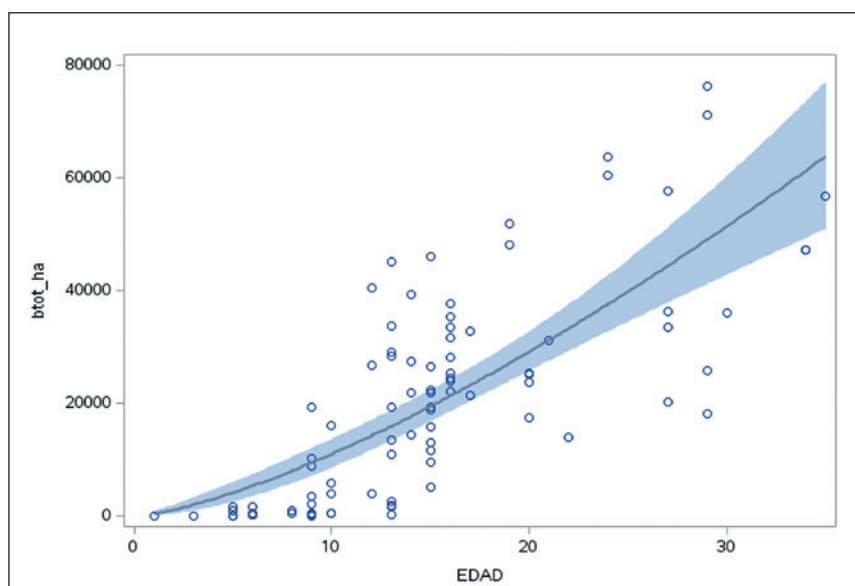


Fig. 4. Biomasa fijada (btot_ha; kg/ha) por una repoblación de *P. pinea* en función de la edad. Cada punto representa una parcela muestreada. La línea representa el modelo potencial y la banda el intervalo de confianza para el valor esperado

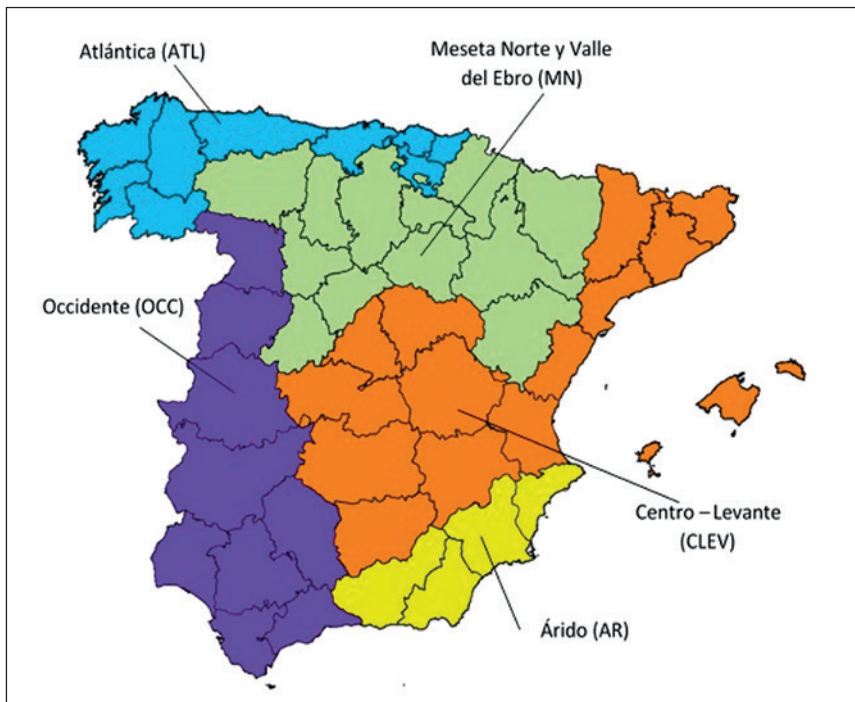


Fig. 5. Mapa de las cinco grandes zonas territoriales para localización de los modelos de fijación de biomasa en repoblaciones

áfica (Figura 5), bien incluyendo la precipitación media anual (obtenida a partir de los modelos climáticos de la Agencia Española de Meteorología) como una variable adicional del modelo. Una versión preliminar de estos modelos está disponible en el repositorio digital del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y puede ser solicitada a los autores. Estos modelos generales permiten dar unas primeras estimaciones del potencial de fijación de biomasa por las principales especies usadas en repoblaciones forestales en España (Tablas 2 y 3). Todas las estimaciones se refieren a biomasa aérea. En el caso de querer dar estimaciones de biomasa total (aérea + subterránea) se utilizan las ratios biomasa raíz — biomasa aérea presentadas en Ruiz-Peinado *et al.* (2011, 2012). Asimismo, en el caso de querer dar valores de CO₂ fijado se recomienda usar los valores de contenido de carbono en biomasa dados en Montero *et al.* (2005) y la relación del peso de la molécula de CO₂ y el átomo de carbono (44/12).

En la actualidad, estamos trabajando en la inclusión de otros atributos relacionados con la propia plantación, principalmente la densidad de plantación. Está previsto analizar la posible entrada de otros parámetros,

como tipo de preparación, pendiente del terreno o uso anterior del suelo, al objeto de mejorar las estimaciones *ex ante* para un proyecto de repoblación determinado.

Modelos de crecimiento en altura y curvas de calidad de estación para repoblaciones

Los análisis de tronco realizados en una submuestra de los árboles apeados nos han permitido construir modelos dinámicos de crecimiento en altura en función de la edad y curvas de calidad de estación para las diez principales especies: *P. halepensis*, *P. nigra*, *P. pinea*, *P. pinaster* y *P. sylvestris* y *Q. ilex*, *Q. suber*, *Q. faginea*, *Q. pyrenaica* y *Q. robur-petraea* (considerando ambas especies en conjunto). Los modelos se construyen empleando el método de las ecuaciones en diferencias algebraicas, que permiten estimar el valor de la variable de interés H (altura media de la repoblación) a una edad T_i , utilizando como variables explicativas el valor medido en campo de esa variable a cualquier otra edad T_j , empleando funciones del tipo:

$$H_i = f(T_i, T_j, H_j)$$

Este tipo de modelos permite definir un *índice de calidad de estación* de la repoblación (IS), que queda definido como la altura media esperada de la repoblación a una edad índice de 30 años en el caso de los pinos, y de 15 años en el caso de las especies del género *Quercus*. Este índice permite comparar el nivel de desarrollo de repoblaciones con distintas edades, y es la base para la construcción de familias de curvas de calidad de estación (p.ej. Figura 6 para *Pinus sylvestris*). Asimismo, para estas diez especies hemos construido ecuaciones que permiten estimar el crecimiento en biomasa de una repoblación empleando como predictoras la densidad inicial de la plantación (N), el índice de calidad de estación y la edad (ecuación 4). Estos resultados han sido publicados en formato abierto en Calama *et al.* (2024).

$$B_{total} = \beta_0 T [\beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 IS]$$

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS MODELOS DESARROLLADOS

Las ecuaciones desarrolladas permiten realizar estimaciones de la biomasa contenida en una repoblación forestal en función de las distintas necesidades del usuario, de la escala espacial y temporal de las estimaciones y de la disponibilidad de datos sobre la repoblación. A continuación, se presentan, de forma breve, las distintas posibilidades de uso, distinguiendo entre las estimaciones de tipo *ex ante*, que se realizan bien antes de realizar la plantación, o cuando no existen mediciones realizadas sobre la misma, y las estimaciones *ex post*, que se realizan una vez establecida la plantación y utilizando datos medidos en la misma.

Estimación *ex ante* del potencial de fijación de biomasa y C atmosférico en un proyecto de repoblación forestal

En este tipo de proyectos se conocen de antemano aspectos relevantes como: superficie exacta, localización geográfica, valores climáticos medios del punto, densidad inicial de plantación y porcentaje

Tabla 3. Valor medio estimado de biomasa fijada en función de la edad para con las principales especies frondosas utilizadas en repoblaciones forestales en España

Especie	Zona	Biomasa contenida (kg M.S. ha-1) a la edad de					Densidad actual
		5	10	15	20	25	
<i>Quercus faginea</i>	1: MN	<100	396	2386	8530	22912	900
	2: OCC + CLEV	<100	517	3263	12057	33229	
<i>Quercus ilex</i>	1: MN	<100	623	3090	9624	23230	750
	2: CLEV + Salamanca + Zamora + Extremadura	119	1832	9085	28295	68297	
	3: Andalucía (salvo Almería y Granada)	<100	1181	5859	18246	44040	
	4: Árido	<100	428	2125	6617	15972	
<i>Quercus suber</i>	1: OCC	267	3352	14724	42074	94995	550
	2: Resto de zonas	184	1964	7851	20985	44988	
<i>Q. robur + petraea</i>	Todas las zonas	301	3854	17126	49346	112133	1400
<i>Q. pyrenaica</i>	Todas las zonas	652	3228	8230	15987	26757	1300
<i>Fraxinus</i> spp.	Todas las zonas	184	2320	10208	29207	66012	350
<i>Betula</i> spp.	Todas las zonas	1189	5355	12917	24127	39171	1150
<i>Fagus sylvatica</i>	Todas las zonas	2742	11714	27388	50035	79849	1400
<i>Olea europaea</i>	Todas las zonas	1437	2119	2659	3124	3540	350
<i>Euc. globulus</i>	Todas las zonas	45277	191620	280059			1300
<i>Euc. nitens</i>	Todas las zonas	77031	309086	445449			1350
<i>Populus</i> híbridos	Todas las zonas		91186	197628			300
<i>Castanea</i> spp. (inc. híbridos)	Producción de madera	4333	20881	52388	100616	166924	800
	Producción de fruto	1726	5593	11127	18128	26470	200

Nota: densidad actual se refiere a la densidad promedio de las repoblaciones analizadas. Cuando no se da estimación es porque los modelos no son fiables a esa edad o no existen suficientes datos en la base. Zonas de acuerdo a lo recogido en figura 5

de representación de cada especie. Utilizando los Ecuaciones de biomasa por hectárea repoblada (ecuación 2) podemos realizar una estimación

de la biomasa que se espera pueda contener una hectárea de esa repoblación en distintos marcos temporales. Es importante indicar que en

esa estimación se está asumiendo un éxito del 100 % en la plantación, por lo que puede ser interesante introducir un factor de corrección si se espera un porcentaje determinado de marras.

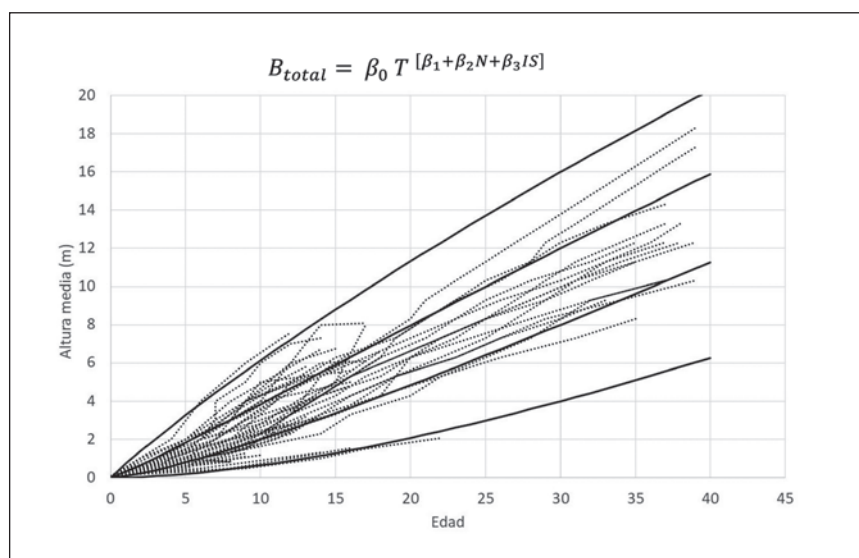


Fig. 6. Curvas de calidad de estación para repoblaciones jóvenes de *P. sylvestris*, forzadas a pasar por las alturas medias 4, 8, 12 y 16 m a la edad de 30 años. Las líneas punteadas representan los análisis de troncos utilizados

Estimación de la capacidad de fijación por las repoblaciones realizadas en una determinada provincia, región o a nivel nacional en un año determinado

Las Ecuaciones de biomasa por hectárea repoblada (ecuación 2) pueden ser útiles también para informar acerca de la capacidad de fijación de las repoblaciones realizadas en un año determinado en una provincia, comunidad o a nivel nacional en marcos temporales determinado. Un ejemplo es la información a nivel nacional que el MITERD debe reportar anualmente en el marco del programa LULUCF. A estas escalas de trabajo

no se dispone de datos específicos de la repoblación (localización, densidad inicial), sino de datos generales como superficie repoblada con una especie o grupo de especies a nivel provincial. En este caso, se usarán aquellas ecuaciones desarrolladas que permitan adaptarse a este tipo de datos, o se utilizarán como predictoras variables del tipo precipitación media provincial.

Estimación expost de la biomasa contenida en una repoblación existente en un momento dado

La verificación de la biomasa real fijada en una repoblación existente requiere de la realización de inventarios de campo de manera similar a los realizados para un inventario a nivel de monte. En el caso de repoblaciones de pequeña superficie y con densidad de plantación homogénea se recomienda realizar un muestreo sistemático, mediante transectos, y parcelas circulares o rectangulares (Hermosilla, 2016). En el caso de parcelas rectangulares en repoblaciones con marco regular deben instalarse siempre dos laterales en la mitad exacta entre dos filas de plantación.

En cada una de las parcelas se medirá el diámetro a la altura del tocón y la altura de todos los pies, y se aplicarán las *Ecuaciones de biomasa de árbol individual* (ecuación 1) que incluyan esas variables como predictoras para calcular la biomasa de cada pie, y a partir de ahí, por agregación, la biomasa contenida en la parcela y en la repoblación. En repoblaciones de gran tamaño, los inventarios de campo pueden sustituirse por inventarios a partir de ortofoto o vuelo LIDAR, utilizando entonces las *Ecuaciones de biomasa de árbol individual* que utilizan como predictoras la proyección de copa o la altura de la planta, variables que pueden inferirse de manera automatizada a partir de las imágenes o las nubes de puntos.

Proyección en el tiempo de las existencias de biomasa y C en una repoblación ya existente

Por último, una vez realizado el inventario por uno u otro método, será

posible determinar la altura media de cada parcela (o de la propia repoblación en el caso de que sea de pequeño tamaño). A partir de este dato, y conocida la edad de la repoblación, se puede calcular el índice de calidad de estación de la repoblación mediante los *modelos de crecimiento en altura, curvas de calidad* (ecuación 3) y realizar una proyección en el tiempo de las existencias de biomasa y carbono de la citada repoblación aplicando los modelos de crecimiento en biomasa (ecuación 4).

CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURO

Las herramientas desarrolladas en fase de desarrollo van a permitir realizar una primera aproximación a la estimación de la biomasa contenida y C atmosférico fijado por las repoblaciones forestales. Estas herramientas tienen utilidad tanto en la estimación previa a la instalación de la repoblación (*exante*) como en la determinación de la biomasa y C fijados por una repoblación ya existente (*expost*), permitiendo además realizar predicciones en el tiempo. El avance futuro de esta línea de inves-



tigación contempla la extensión de la red de parcelas en repoblaciones a especies poco representadas y regiones no muestreadas, la mejora de los modelos para considerar variables propias de la plantación (densidad inicial) y la aplicación de todas estas herramientas en calculadoras de acceso libre.

BIBLIOGRAFÍA

- Calama R, Ruíz-Fernández F, Menéndez-Miguélez M et al. 2022. Nuevos modelos para estimación de biomasa y CO₂ fijado en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Galicia. *Actas del 8º Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Calama R, Madrigal G, del Río M et al. 2024. Dynamic height growth equations and site indexed biomass models for young native species afforestations in Spain. *Forests* 15(5): 827.
- Chazdon R, Brancalion P. 2019. Restoring forests as a means to many ends. *Science* 364: 24–25.
- Griscom BW, Adams J, Ellis PW et al. 2017. Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114: 11645–11650.
- Hermosilla B. 2016. Elaboración de un protocolo para el muestreo en el seguimiento de repoblaciones forestales. Trabajo fin de Máster. Universidad de Alcalá de Henares.
- Menéndez-Miguélez M, Álvarez-Álvarez P, Pardos M et al. 2023 Development of tools to estimate the contribution of young sweet chestnut plantations to climate-change mitigation. *For. Ecol. Manag.* 530: 120761.
- Menéndez-Miguélez M., Calama R, Del Río M et al. 2022. Species-specific and generalized biomass models for estimating carbon stocks of young reforestations. *Biomass Bioenergy* 161: 106453.
- MITECO. 2022. *Anuario de estadística forestal*. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- Montero G, Ruiz-Peinado R, Muñoz M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. INIA, Madrid.
- Robla E, González AI. 2018. La importancia de las tierras forestales en el nuevo reglamento LULUCF de la Unión Europea. *Montes* 134: 10-15
- Ruiz-Peinado R, Montero G, Del Río M. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *For. Syst.* 21, 42.
- Ruiz-Peinado R, Del Río M, Montero G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *For. Syst.* 20: 176-188.
- Vadell E, De-Miguel S, Pemán J. 2016. Large-scale reforestation and afforestation policy in Spain: a historical review of its underlying ecological, socioeconomic and political dynamics. *Land Use Policy* 55: 37-48.
- Veldman JW, Aleman JC, Alvarado ST et al. 2019. Comment on "The global tree restoration potential". *Science* 366(8): 1-5.
- Ximénez de Embún J, Ceballos L. 1996. Plan general para la repoblación forestal de España. En: Organismo Autónomo Parques Nacionales (Ed.) *Tres trabajos forestales, facsimil*, pp 8-388. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.